

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ
И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.46:574.4:630*43

ИЗМЕНЕНИЕ АКТИВНОСТИ ФЕРМЕНТОВ В ПОСТПИРОГЕННЫХ
ПОЧВАХ (ФИЗИЧЕСКИЙ МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ)© 2023 г. В. Д. Приходько^а, К. Ш. Казеев^{а, *}, В. В. Вилкова^а,
М. С. Нижельский^а, С. И. Колесников^а^аЮжный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, Ростов-на-Дону, 344090 Россия

*e-mail: kamil_kazeev@mail.ru

Поступила в редакцию 01.06.2022 г.

После доработки 27.06.2022 г.

Принята к публикации 28.07.2022 г.

Представлены данные по изменению ферментативной активности почв при пирогенном воздействии в модельных экспериментах, имитирующих природные пожары. В лабораторных и естественных условиях выполнена серия опытов, направленных на изучение пирогенного ингибирования активности ферментов и динамики их восстановления в постпирогенных почвах. Объектами исследования явились песчаная почва (серопески, Arenosol) и чернозем миграционно-сегрегационный (Haplic Chernozem (Loamic, Pachic)) Ростовской области. Модельные опыты выполнены путем обработки почвенных образцов пламенем газовой горелки (количество теплоты $87\text{--}435 \times 10^3$ Дж) и пирогенного воздействия при горении древесного топлива ($10\text{--}279 \times 10^6$ Дж). В первом случае продолжительность воздействия составила от 1 до 5, во втором — от 1 до 120 мин. Выявлен отклик ферментов (каталазы, инвертазы, уреазы, пероксидазы и фосфатазы) на воздействие низкотемпературной плазмы (1–120 мин), который отличался в зависимости от группы фермента и степени воздействия. Установлено, что глубина проникновения термического воздействия при имитации пожаров ограничивается верхним слоем почвы (0–10 см), а радиус распространения относительно источника горения не превышает 20 см. Температурные значения варьировали в зависимости от времени, источника воздействия и количества топлива (400–600°C). Песчаные почвы и чернозем нагревались и остывали с разной скоростью. Выявлена обратная зависимость активности каталазы, инвертазы и уреазы от интенсивности воздействия пирогенного фактора. Прослежена динамика восстановления активности ферментов в постпирогенных почвах. Активность инвертазы восстанавливается быстрее, чем активность каталазы и уреазы, но полного восстановления спустя год не происходит. Полученные результаты свидетельствуют о значительно пролонгированном эффекте ингибирования ферментативной активности при имитации природных пожаров.

Ключевые слова: пожары, пал, биологические индикаторы, ферментативная активность

DOI: 10.31857/S0032180X22600743, **EDN:** JKAGRD

ВВЕДЕНИЕ

Пожары приносят большой вред лесному хозяйству. В результате возгорания гибнут древостои, растения, животные и насекомые, изменяется биогеоценоз [21]. Степные пожары также являются важным экологическим фактором, влияющим на состояние растительности и почвы. Выгорание растительности в степях вызывает разнообразные изменения в последующем развитии растительного покрова. Различные растения по-разному реагируют на данный фактор, результатом чего является не только исчезновение отдельных видов, но и преобразование всего ценоза [2]. Прямым следствием сильных лесных пожаров является уничтожение растительного покрова и изменение свойств почвы и ее биологического

разнообразия [26, 33]. Кроме того, пожары оказывают значительное воздействие на физические свойства почв [18]. Например, Стооф с соавт. [37] продемонстрировали, что сжигание почвы при температуре 400°C может уменьшить потенциальные запасы воды, а некоторые исследования показали, что в течение десяти лет после пожара показатели pH почвы могут увеличиваться [22]. Эти изменения физико-химических свойств почвы делают ее более подверженной эрозии [32].

Биологическая диагностика и индикация почв является перспективным направлением исследований экологического состояния почв [17, 19, 29], их плодородия [11, 20] и устойчивости к антропогенному воздействию. При этом используют микробиологические [3, 6] и биохимические показатели [8].

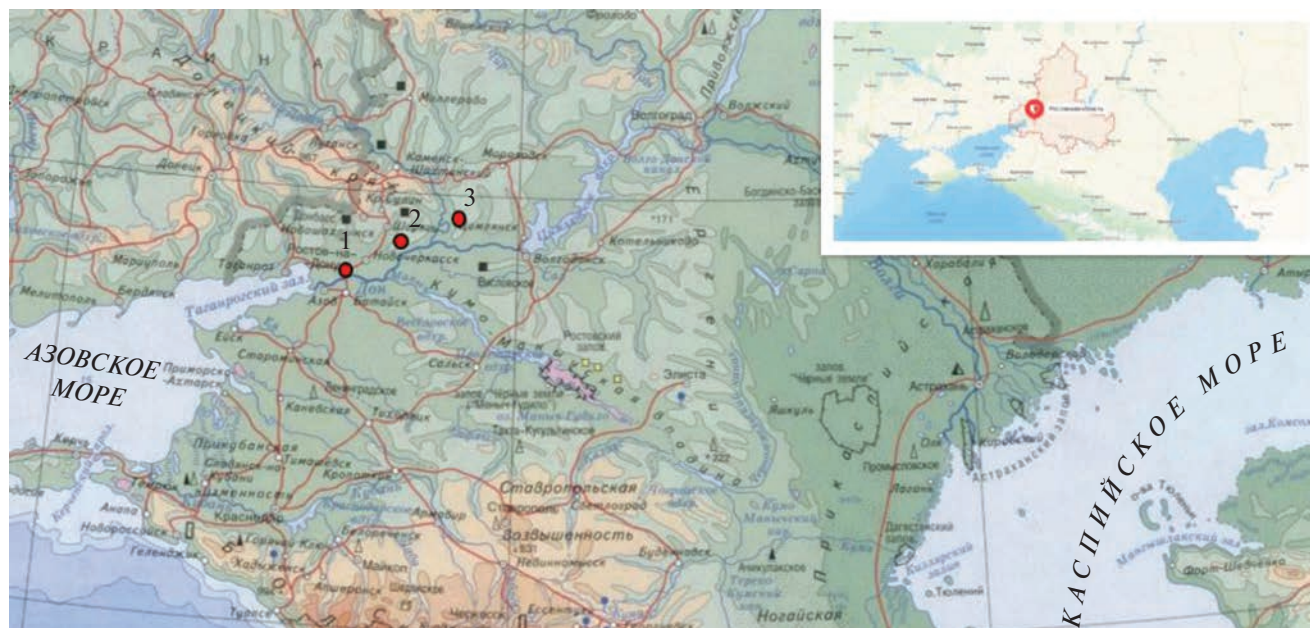


Рис. 1. Расположение объектов исследования: 1 — питомник ботанического сада ЮФУ, 2 — ООПТ Персиановская степь, 3 — ООПТ “Кундрюченские пески”.

Почвенные ферменты играют важную роль в катализе реакций, необходимых для разложения органического вещества и круговорота химических элементов [34], важных для питания растений и жизнедеятельности микроорганизмов [25]. Таким образом, изменения активности ферментов могут повлиять на доступность питательных элементов для поглощения растениями, и эти изменения могут служить чувствительными индикаторами состояния почвы [4, 16, 24]. Активность почвенных ферментов в значительной степени зависит от физико-химических свойств почвы и часто используется в качестве показателей микробной активности и плодородия почвы [23, 36]. В естественной, ненарушенной экосистеме процессы минерализации способствуют преобразованию питательных элементов, которые в дальнейшем поглощаются растениями. В поврежденном пожаром лесу чрезмерный нагрев почвы может вызвать денатурацию почвенных ферментов, тем самым косвенно влияя на круговорот питательных элементов [14, 15, 30]. Кроме того, часть питательных элементов может быть потеряна из экосистемы в результате улетучивания или конвекции летучей золы во время сжигания или последующего выщелачивания в грунтовые воды и стоки [10].

Пирогенное воздействие на почву является актуальной темой исследования для ученых во всем мире. Есть много примеров изучения свойств почвы при кратковременных сроках после воздействия огня [9, 31, 35, 37, 39]. Однако до сих пор недостаточно модельных опытов, посвя-

щенных вопросам длительности угнетения ферментативной активности (ΦA) и скорости ее восстановления.

Цель работы — исследование влияния пирогенного воздействия на ингибирование активности и последующее восстановление ферментов как важных индикаторов экологического состояния почв.

Основными задачами для проведения исследования были: 1 — оценка степени нагрева почвы при пирогенном воздействии; 2 — определение отклика почвенных ферментов сразу после пирогенного воздействия и динамики изменения ферментативной активности через месяц, полгода и год. Полученные данные могут быть использованы при оценке повреждения почв при пожарах и поиске способов ускорения их последующего восстановления.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Модельные эксперименты проводили с разными почвами юга европейской части России. Целинный чернозем обыкновенный отбирали на особо охраняемой природной территории “Персиановская степь” (Октябрьский район Ростовской области), которая является эталоном настоящих типчаково-ковыльных степей Нижнего Дона [7] (рис. 1). Модельные опыты были проведены в Ботаническом саду Южного федерального университета. Этот объект широко используется при мониторинге окружающей природной среды, в том числе почвенного покрова [1, 13, 14]. Почвы

Таблица 1. Базовые показатели химического и вещественного состава исследуемых почв

Показатель	ООПТ “Персиановская степь”	Питомник ботанического сада “ЮФУ”	ООПТ “Кундрюченские пески”
Географические координаты	47°30'18.86" с. ш. 40°9'16.68" в. д.	47°14'3.47" с. ш. 39°38'55.73" в. д.	47°46'9.47" с. ш. 40°51'15.70" в. д.
Мощность горизонта А, см	37–49	29–35	9–12
Мощность гумусовых горизонтов А + АВ, см	72–82	65–75	45–50
Содержание физической глины (<0.01 мм) в верхнем горизонте, %	48.1	53.4	10
рН водный в слое 0–20 см	7.8	8.1	6.8
Содержание гумуса в горизонте А (0–10 см), %	6.8–7.5	3.7–4.1	1.8–2.2
ЕКО смоль(экв)/кг	34.4	37.5	2.5

обоих участков являются черноземами обыкновенными карбонатными среднесильными малогумусными тяжелосуглинистыми (Haplic Chernozem (Loamic, Pachic)) [1, 13, 15]. Подобные черноземы занимают большую часть территории юга европейской части России, и являются одними из самых продуктивных почв мира.

Последний объект – ООПТ “Кундрюченские пески” (Усть-Донецкий район), занимающая более 20 тыс. га с искусственным насаждением сосны. Здесь распространены пески и серопески – своеобразные песчаные гумусированные почвы (Eutric Arenosol (Humic)), площадь которых в Ростовской области – 220 тыс. га. Базовые показатели химического и вещественного состава почв приведены в табл. 1.

Для достижения поставленных задач была проведена серия модельных экспериментов двух видов: в искусственных (контролируемых) и естественных условиях. При моделировании применяли воздействие газовой горелкой, которое не в полной мере имитирует природный пожар, но используется авторами с целью воспроизводимости эксперимента и возможности регулирования степени (времени) воздействия. Для первого опыта из ООПТ “Персиановская степь” был отобран монолит чернозема ненарушенного сложения размером 25 × 25 × 10 см. С его поверхности был удален слой ветоши и срезана под корень разнотравно-злаковая растительность. С территории Усть-Донецкого лесничества были отобраны образцы песчаной почвы. Почву высушили в тени при температуре 25–30°C, монолит был разделен на несколько частей. Верхний слой, мощностью 5 см, поместили в алюминиевые контейнеры, площадь поверхности составила 45 см². Для исследования проникновения температурного воздействия в нижележащие слои, на дне алюминиевых контейнеров был установлен температурный

логгер. Затем все образцы кроме контрольных были подвержены воздействию пламени горелки на расстоянии 10 см от поверхности почвы в течение 1, 2 и 5 мин. Температура пламени составляла 800–1000°C. Количество теплоты, выделяемое при горении газовой горелкой, было найдено с помощью формулы для расчета теплоты сгорания газозооной смеси. При этом учитывалась теплота сгорания каждого газа из смеси в соответствии с его процентным содержанием в баллоне. Таким образом, при одноминутном горении выделяется 87×10^3 Дж, при двухминутном горении – 174×10^3 Дж, а при пятиминутном – 435×10^3 Дж. При этом на 1 см² почвы поступало 19×10^2 Дж в первом варианте, 38×10^2 Дж во втором варианте и 96×10^2 Дж в третьем варианте.

Схема первого модельного опыта (МО1)

1. Контроль – чернозем без воздействия.
2. Чернозем + огонь – 1 мин (глубина 0–1 см).
3. Чернозем + огонь – 2 мин (глубина 0–1 см).
4. Чернозем + огонь – 5 мин (глубина 0–1 см).
5. Чернозем + огонь – 5 мин (глубина 0–5 см).
6. Контроль – серопески без воздействия.
7. Серопески + огонь – 1 мин (глубина 0–1 см).
8. Серопески + огонь – 2 мин (глубина 0–1 см).
9. Серопески + огонь – 5 мин (глубина 0–1 см).
10. Серопески + огонь – 5 мин (глубина 0–5 см).

Температура на поверхности почвы измерялась с помощью пирометра (СЕМ DT-8833), а на глубине 5 см с помощью логгеров – температурных датчиков ТЕРМОСНОН. Далее в вариантах 2–4 и 7–9 был отобран верхний слой 0–1 см, а у 5 и 10 – нижний слой 4–5 см. Все образцы были очищены от растительных остатков, перетерты и просеяны через сито 1 мм и проанализированы традиционными методами [12]. Для сравнения

использовали контрольные образцы, которые не подвергали пирогенному воздействию.

Целью второго модельного опыта было проследить за динамикой восстановления активности ферментов постпирогенных почв в контролируемых условиях. Для этого просеянные через сито 3 мм образцы чернозема были помещены в алюминиевые формы слоем мощностью 5 см с площадью поверхности 45 см² и подвержены пирогенному воздействию газовой горелки в течение 1, 2 и 5 мин. Верхний слой мощностью 1 см был отделен и просеян через сито 1 мм. Лабораторные исследования были выполнены сразу после проведения опыта (первый срок) и через 30 сут (второй срок), через полгода (третий срок) и через год (четвертый срок).

Схема второго модельного опыта (МО2)

1. Контроль – чернозем без огня.
2. Чернозем + огонь – 1 мин.
3. Чернозем + огонь – 2 мин.
4. Чернозем + огонь – 5 мин.

Все образцы инкубировали в одинаковых условиях при комнатной температуре. Образцы увлажнили до влажности 30% от массы почвы и инкубировали в контейнере с открытыми емкостями воды с целью создания высокой влажности воздуха для предотвращения пересыхания почвы. Периодически почву увлажняли до 30% влажности.

Третий модельный опыт был проведен в полевых условиях в питомнике на многолетней злаково-разнотравной залежи Ботанического сада Южного федерального университета. Модельный опыт заключался в заложении трех площадок площадью 1 м² на почвах ненарушенного сложения с разным количеством горючего материала (березовая древесина и хворост древесных пород Ботанического сада). Количество топлива варьировало от 1 кг (в первом варианте), 6,2 кг во втором варианте, до 18,6 кг в третьем варианте.

Схема третьего модельного опыта (МО3)

1. Контроль – глубина 0–3 см.
2. Контроль – глубина 10–20 см.
3. Контроль – глубина 20–30 см.
4. Костер 1 – (10×10^6 Дж); глубина 0–3 см.
5. Костер 2 – (93×10^6 Дж); глубина 0–3 см.
6. Костер 3 – (279×10^6 Дж); глубина 0–3 см.
7. Костер 3 – (279×10^6 Дж); глубина 7–12 см.
8. Костер 3 – (279×10^6 Дж); глубина 25–30 см.

Количество теплоты, выделяемое при горении костров, рассчитывалось путем перемножения удельной теплоты сгорания хвороста (10×10^6 Дж/кг) и березы (15×10^6 Дж/кг) и массы топлива, заложенного для каждого костра. Удельная теплота сгорания хвороста была принята как 10^7 Дж/кг. При пересчете на площадь костра и учете, что в при-

родных условиях часть энергии поступает не в почву, а в атмосферу, количество энергии, поступившей на 1 см² почвы равно примерно 5×10^2 Дж в первом, 47×10^2 Дж – во втором и 14×10^3 Дж – в третьем вариантах. Для измерения температурного воздействия огня использовались электронные термометры Checktemp, пирометр и логгеры. Температуру почвы измеряли на глубине 1 см в центре кострища, на его границе и на расстоянии 20 и 50 см от края костра. Логгеры были заложены на участке с максимальным количеством топлива на глубине 10, 20 и 30 см. Почвенные образцы были отобраны из центра каждого костра методом режущего кольца, просушены и просеяны через сито 1 мм. Серия анализов ферментативной активности была проведена сразу после завершения модельного опыта (первый срок) и спустя год (второй срок).

Образцы почв анализировали, применяя методы определения активности ферментов (каталазы и пероксидазы по А.Ш. Галстяну; инвертазы колориметрическим методом с реактивом Феллинга; фосфатазы с помощью модифицированного метода А.Ш. Галстяна и Э.А. Арутюняна) [12]. Метод определения активности каталазы основан на определении объема кислорода, выделяющегося при разложении перекиси водорода. Метод определения активности пероксидазы основан на учете фотометрических измерений количества бензохинона, образованного при окислении гидрохинона. Метод определения активности фосфатазы основан на учете фосфора при гидролизе фенолфтолеинфосфата натрия. Активность почвенной уреазы определяли с использованием метода определения содержания аммонийного азота в почве с помощью реактива Несслера при гидролизе мочевины. Метод определения активности инвертазы почв основан на изменении оптических свойств реактива Феллинга при восстановлении меди глюкозой из инвертированного раствора сахарозы после воздействия фермента.

Статистическая обработка данных выполнена в программе Statistica с использованием критериев Колмогорова–Смирнова, Шапиро–Уилка и Краскела–Уоллеса. Для установки влияния количественного фактора на количественный отклик использовали корреляционный анализ Спирмена. При обсуждении результатов учитывали статистически достоверные различия с уровнями значимости 0.1–5% ($p < 0.001$, 0.01 и 0.05).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние огня (низкотемпературной плазмы) на температуру почв. В ходе первого опыта температура поверхности почвы уже после первой минуты нагревания составила около 400°C. Далее скорость температурного роста постепенно замедля-

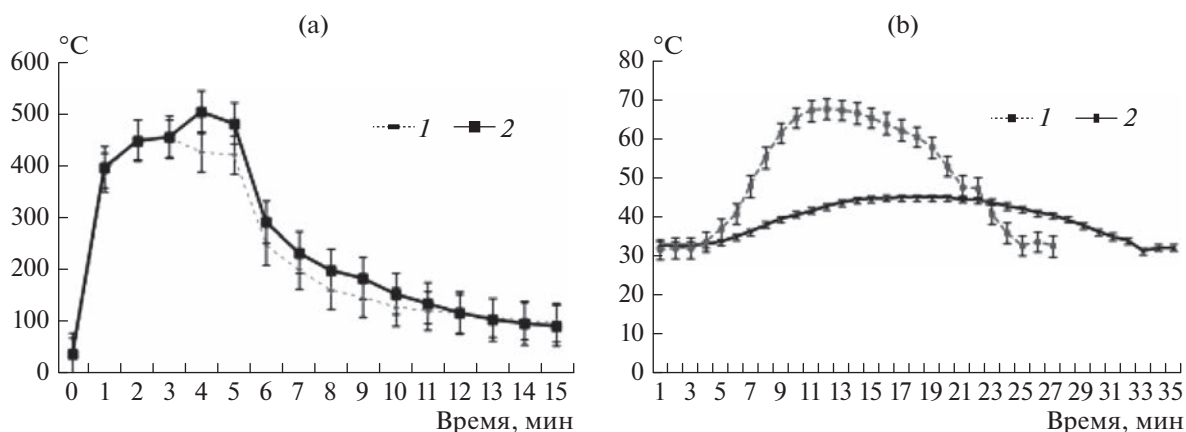


Рис. 2. Динамика изменения температур почвы при нагреве горелкой (МО1): а – на поверхности почвенных образцов (пирометр); б – на глубине 5 см (логгеры): 1 – серопески, 2 – чернозем.

лась, и при максимальном воздействии (5 мин) составила 482°C. Однако на глубине 5 см была отмечена равномерная скорость роста температуры, которая изменялась от 33°C в первые минуты до 46°C спустя 13 мин после начала нагревания, далее происходило медленное остывание (рис. 2б). Такая резкая разница в скорости нагревания на разной глубине объясняется наличием воздушной прослойки между почвенными частицами, которая обладает теплоизолирующими свойствами. После пятиминутного нагревания песчаной почвы на поверхности песчаных образцов температура составила 422°C. На глубине 5 см при нагревании в течение 5 мин температура на 22°C превышала соответствующие показатели чернозема. Слой песчаной почвы прогревается быстрее чернозема, но его способность сохранять температуру гораздо ниже таковой у чернозема (рис. 2а).

После обработки пламенем горелки наблюдали морфологические изменения почвы. Так, при 1–2-минутном нагревании было отмечено почернение поверхности почвы, а при воздействии в течение 5 мин происходит покраснение почвы, что объясняется окислением минералов железа при высоких температурах [38].

Второй опыт проводили в полностью контролируемых условиях на почвах, которые были предварительно просеяны через сито (1 мм) и исследованы в течение нескольких сроков. Максимальная температура в ходе пирогенного воздействия была достигнута в варианте 4 и составила 537°C. После воздействия в течение 1 мин максимальная температура составила 477°C (вариант 3).

По результатам опыта, проведенного в полевых условиях, максимальная температура пламени превысила 600°C в центре второго и третьего костра и достигла 549°C в центре первого костра (рис. 3а). Время горения костра составило около 120 мин. По данным измерений термометром на

границе костра самая высокая температура поверхности почвы (78°C) была зафиксирована в варианте с наибольшим количеством топлива (279×10^6 Дж, костер 3). Нагрев почвы значительно ослабевает при удалении от центра костра. По данным измерений пирометром через 20 мин на границе костра с наименьшим количеством древесного топлива (костер 1) температура поверхности почвы достигала 36°C. На границе костра с наибольшим количеством топлива (костер 3) была зафиксирована температура 428°C (рис. 3б), а на расстоянии 20 см от края костра всего 25°C. Кроме того, температурный эффект практически не затрагивает почву на глубине 20 см даже в центре костра (повышение на 10°C), в то время как на глубине 10 см (увеличение до 68°C) (рис. 3с, 3д). Установленные данные сильно отличаются от данных, полученных Хамфрисом и Крейгом [28], которые изучили температуру почвы во время различных пожаров в австралийских экосистемах. Они обнаружили, что температура поверхности почвы достигает 200°C, а на глубине 2–3 см температура почвы не превышает температуру окружающей среды. Разница температурных показателей поверхности почвы и нижележащих слоев может объясняться несколькими причинами. Во-первых, существует разница в длительности и температуре воздействия, то есть влияние в течение 10 с при 1000°C не всегда может быть сравнимо с воздействием в течение 30 мин при температуре 300°C. Эффект зависит также от параметров влажности и минерального состава почвы. Во-вторых, температура почвы во время пожаров является средней величиной, так как небольшие частицы, богатые органическим веществом, могут гореть на поверхности почвы, температура этих частиц может достигать более 1000°C, что будет существенно влиять на показатели измерительных приборов [27].

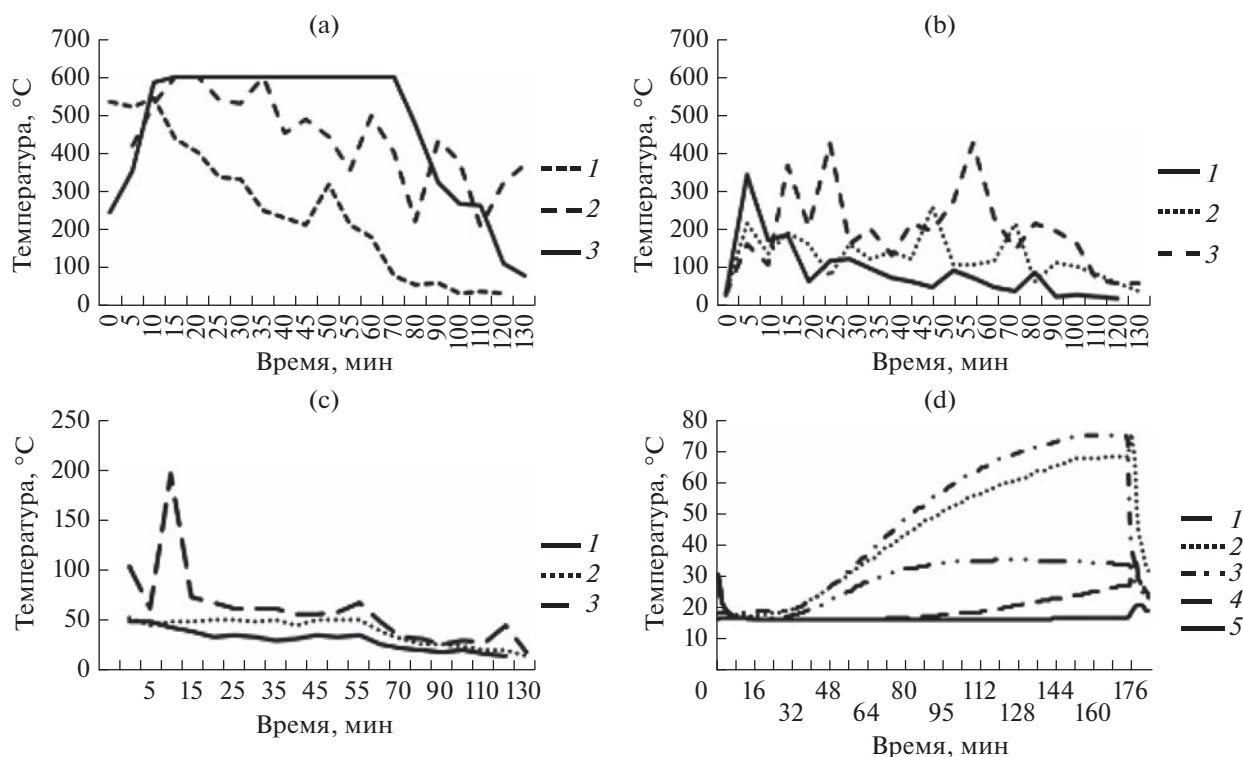


Рис. 3. Динамика изменения температур при пирогенном эффекте (МО3): а – данные пирометра в центре каждого костра: 1 – центр первого костра, 2 – центр второго костра, 3 – центр третьего костра; б – данные пирометра, край каждого костра: 1 – край первого костра, 2 – край второго костра, 3 – край третьего костра; в – данные на расстоянии 20 см от края костра: 1 – первый костер, 2 – второй костер, 3 – третий костер; д – данные логгеров: 1 – на глубине 10 см в центре первого костра, 2 – на глубине 10 см в центре второго костра, 3 – на глубине 10 см в центре третьего костра, 4 – на глубине 20 см в центре третьего костра, 5 – на глубине 30 см в центре третьего костра.

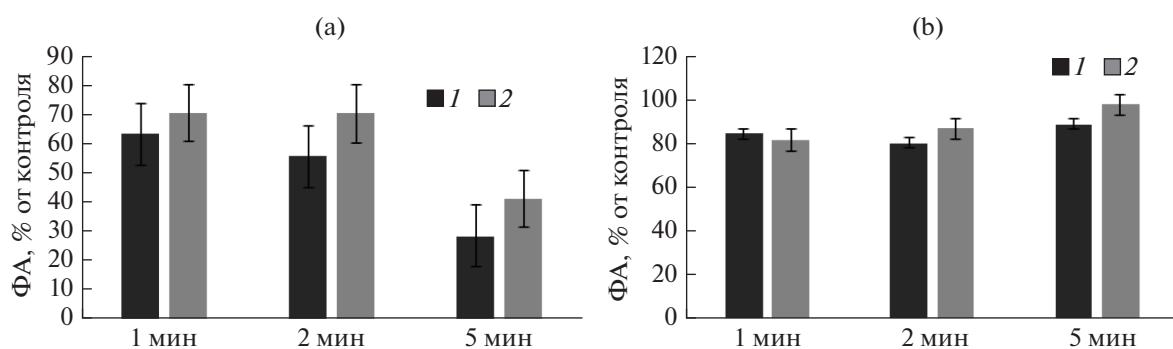


Рис. 4. Изменение ферментативной активности постпирогенных образцов в верхнем слое (МО1): а – изменение каталазной активности: 1 – серопески, 2 – чернозем; б – изменение активности инвертазы.

Биоиндикация восстановления постпирогенной почвы. В опыте 1 было установлено, что активность каталазы уменьшается с увеличением времени нагревания образцов (рис. 4а) и, следовательно, температуры, что соответствует ранее полученным данным [13]. При максимальной степени воздействия (5 мин) и температуре свыше 500°C активность каталазы уменьшилась больше, чем на

половину относительно контрольного варианта, что объясняется белковым строением ферментов и, следовательно, их денатурацией при температурах свыше 40–50°C.

Активность инвертазы из класса гидролаз также, в целом, уменьшается, при этом существует небольшая разница в уменьшении активности фермента в серопесках и черноземе (рис. 4б).

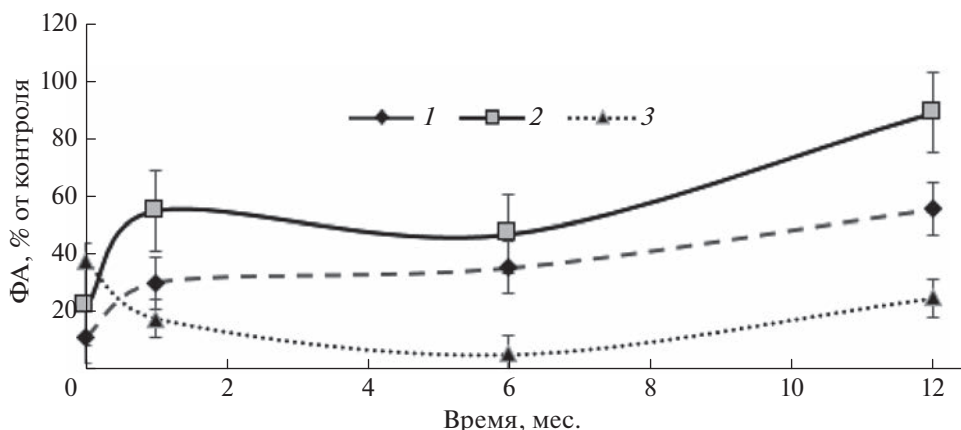


Рис. 5. Изменение ферментативной активности постпирогенных образцов сразу после воздействия огня в поверхностном слое, опыт 3: 1 – каталаза, 2 – инвертаза, 3 – уреаза.

В результате анализа почвы сразу после пирогенного воздействия было отмечено значительное снижение активности ферментов обоих классов (рис. 5). Но в отличие от данных, полученных ранее [13], наибольшее уменьшение было установлено для каталазы – на 90% относительно контроля, что привело к практически полной инактивации фермента. Активность инвертазы уменьшилась на 80%, а активность уреазы больше, чем на 60%.

Анализ данных, полученных спустя месяц после проведения опыта, показал, что активность каталазы, в целом, увеличивается. Наибольшая разница установлена при максимальном воздействии пламени горелки (29%). Ферменты из класса гидролаз реагируют неодинаково. Активность инвертазы увеличилась на 25% относительно первого срока при одноминутном воздействии, на 20% при двухминутном воздействии и на 33% при пятиминутном воздействии. В то время как показатели уреазы уменьшаются. Такой результат соответствует литературным источникам, в которых указано, что для восстановления активности инвертазы необходимо около полутора месяцев, а на восстановление уреазы требуется не менее года, что может объясняться более высокой чувствительностью фермента к пирогенному воздействию [5]. Механизм восстановления активности почвенных ферментов заключается в стимулировании микробиологической активности за счет повторного увлажнения почвенных образцов в течение их инкубирования.

При дальнейшем изучении динамики активности ферментов установлена тенденция к восстановлению активности ферментов обоих классов. Наиболее наглядно степень восстановления можно наблюдать в варианте пятиминутного нагрева образцов. Спустя год после проведения опыта активность каталазы увеличилась на 42%

относительно первого срока. Активность инвертазы увеличилась на 67%. Показатели активности уреазы постепенно снижались в течение полугода, но спустя год наблюдается увеличение активности фермента на 20% относительно полугодичного срока.

Полевое моделирование последствий пирогенного воздействия. Изучение ферментативной активности в опыте 3 показало, что самым чувствительным индикатором пирогенного воздействия стала каталаза, которая практически полностью инактивируется при максимальных температурах (рис. 6а). Активность фосфатаз не снижается, а наоборот – увеличивается.

Уреаза также является высокочувствительным ферментом по отношению к температуре. Уже при поступлении энергии, равной 10×10^6 Дж, активность данного фермента уменьшилась в 2 раза относительно данных контрольного образца, при увеличении количества тепловой энергии до 93×10^6 Дж ферментативная активность резко снижается, как и при тепловой энергии, равной 279×10^6 Дж.

Сокращение активности инвертазы в первом варианте идет интенсивнее, чем у других ферментов, но с увеличением температуры интенсивность спада активности уменьшается, и в образцах второго и третьего варианта снижение активности фермента одинаково.

Анализ активности пероксидазы показал достаточно слабую зависимость от пирогенного воздействия, так как в образцах первого костра, было выявлено небольшое увеличение активности, а второго – наоборот снижение и, наконец, в образцах, собранных с третьего костра, активность пероксидаз осталась практически без изменения.

При проведении сравнения с ранее полученными данными по изменению ферментативной

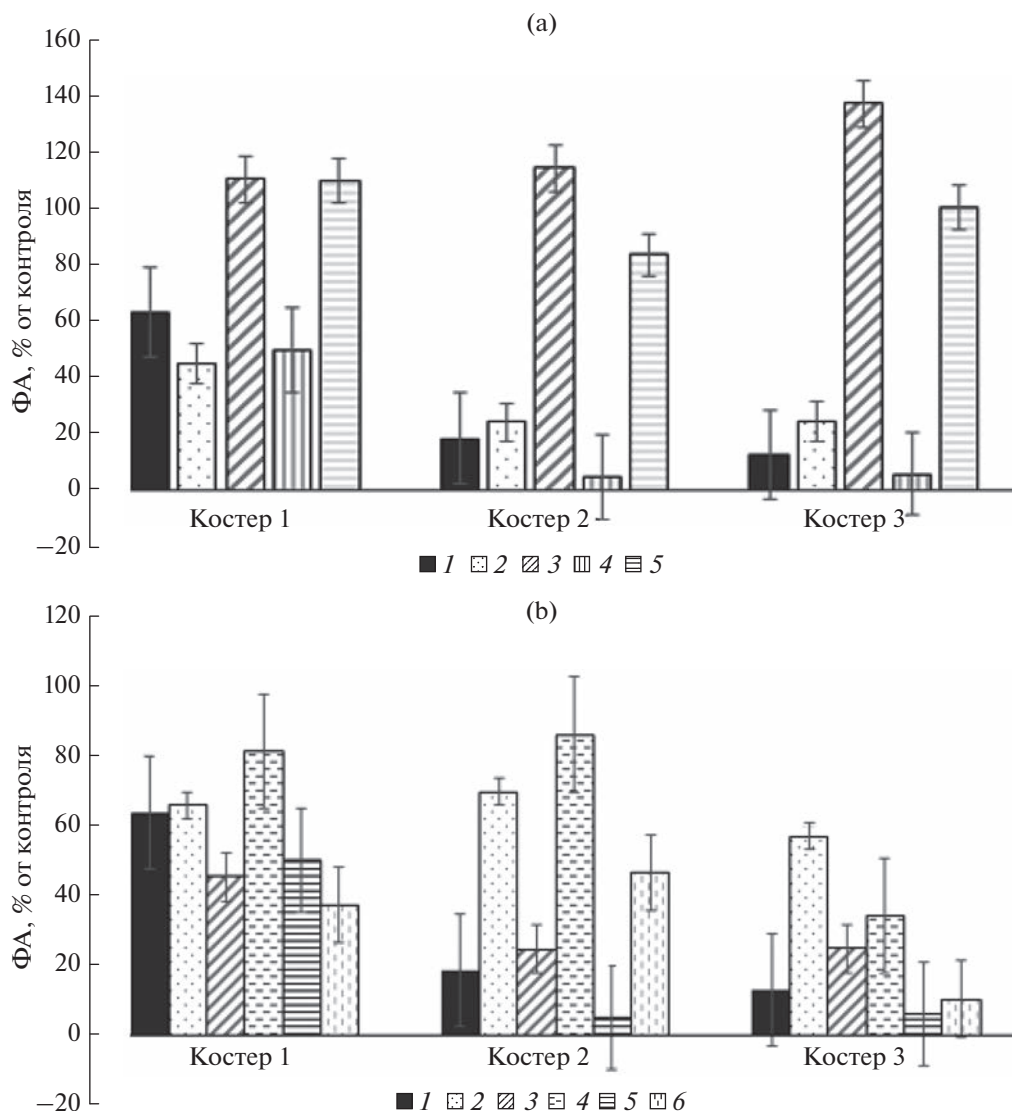


Рис. 6. Ферментативная активность постпирогенных почв: а – сразу после воздействия огня в поверхностном слое, опыт 3: 1 – каталаза, 2 – инвертаза, 3 – фосфатаза, 4 – уреазы, 5 – пероксидаза; б – через год после воздействия огня в верхнем слое, опыт 3: 1 – каталаза сразу после воздействия, 2 – каталаза через год, 3 – инвертаза сразу после воздействия, 4 – инвертаза через год, 5 – уреазы сразу после воздействия, 6 – уреазы через год.

активности [13] было установлено большее уменьшение значений показателей ферментативной активности, что, вероятно, связано с большим количеством топлива и, следовательно, большим количеством теплоты, переданным почве в результате его сгорания.

Через 12 мес. после проведения полевого модельного опыта было установлено увеличение ферментативной активности, величина которой зависела от степени пирогенного повреждения почвы (рис. 6б). В образцах, подвергшихся минимальной интенсивности пирогенного воздействия, активность каталазы практически не изменилась, активность инвертазы спустя год увеличилась в 1.5 раза относительно 2019 г., однако

активность уреазы, наоборот, уменьшилась. В образцах второго костра выявлена наибольшая степень восстановления активности исследуемых ферментов. Активность каталазы и инвертазы увеличилась в 3 раза, а уреазы – в 3 раз. Анализ результатов третьего костра показал высокий процент восстановления каталазной активности и низкий процент активности инвертазы и уреазы.

ВЫВОДЫ

1. В черноземах температурный эффект от пирогенного воздействия распространяется на большую глубину относительно песчаных почв. После обработки пламенем горелки наблюдаются

морфологические изменения почвы. Максимальная температура и, следовательно, количество энергии было достигнуто в опыте, проведенном в естественных условиях при горении костров с количеством энергии 93×10^6 и 279×10^6 Дж, температура превысила 600°C . Температурный эффект в почве быстро ослабевает с расстоянием от источника воздействия (повышение температуры на расстоянии 20 см было не более 5°C). С глубиной пирогенный эффект также значительно ослабевает.

2. Установлена разная степень чувствительности ферментов к пирогенному воздействию. По чувствительности ферменты располагаются в ряд каталаза > уреазы > инвертаза > фосфатаза = пероксидаза.

3. После пирогенного воздействия при оптимальной влажности тенденция к восстановлению ферментативной активности наблюдается уже через месяц после проведения опыта, при этом скорость восстановления зависит от вида фермента: инвертаза > каталаза > уреазы. Наиболее медленный процесс восстановления отмечен для активности уреазы, которая через год при максимальных воздействиях восстановилась всего до 10–25% от контрольных значений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при государственной поддержке гранта для Ведущих научных школ РФ (НШ-449.2022.5) и гранта Министерства науки и высшего образования РФ на создание Лаборатории молодых ученых (№ ЛабНОЦ-21-01АБ), ПСАЛ ЮФУ (“Приоритет 2030”, № СП-12-22-9).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаренко (Мясникова) М.А., Казеев К.Ш., Ермолаева О.Ю., Колесников С.И. Изменение растительного покрова и биологических свойств черноземов в постагрогенный период // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1412–1422.
2. Анилова Л.В., Шорина Т.С., Пятинина Е.В. К вопросу о влиянии пирогенного фактора на растительный покров степей Оренбургского Предуралья // Вестник Оренбургского гос. ун-та. 2011. № 12(131). С. 19–20.
3. Ветрова А.А., Трофимов С.Я., Кинжаев Р.Р., Аветов Н.А., Арзамасова А.В., Пунтус И.Ф., Сазонова О.И., Соколов С.Л., Стрелецкий Р.А., Петриков К.В., Делеган Я.А., Самойленко В.А., Филонов А.Е. Разработка микробного консорциума для биоремедиации нефтезагрязненных почв Среднего Приобья // Почвоведение. 2022. № 5. С. 642–654. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22050100094>
4. Вилкова В.В., Казеев К.Ш., Шханацев А.К., Колесников С.И. Реакция ферментативной активности почв ксерофитных лесов черноморского побережья Кавказа на пирогенное воздействие // Аридные экосистемы. 2022. Т. 28. № 1(90). С. 107–114.
5. Габбасова И.М., Гарипов Т.Т., Комиссаров М.А., Сулейманов Р.Р., Суюндуков Я.Т., Хасанова Р.Ф., Назырова Ф.И. Влияние пожаров на свойства степных почв Зауралья // Почвоведение. 2019. № 12. С. 1513–1523.
6. Гродницкая И.Д., Карпенко Л.В., Пашкеева О.Э., Гончарова Н.Н., Старцев В.В., Батурина О.А., Дымов А.А. Влияние лесных пожаров на микробиологические свойства торфяных олиготрофных почв и торфяно-подзолов глеевых в болотах северной части Сым-Дубчесского междуречья (Красноярский край) // Почвоведение. 2022. № 4. С. 454–468. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22040098>
7. Даденко Е.В., Мясникова М.А., Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Биологическая активность чернозема обыкновенного при длительном использовании под пашню // Почвоведение. 2014. № 6. С. 724–733.
8. Дубровина И.А. Влияние биоугля на агрохимические показатели и ферментативную активность почв средней тайги Карелии // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1523–1534. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21120054>
9. Дымов А.А., Старцев В.В., Горбач Н.М., Паюсова И.В., Гайов Д.Н., Доннерхак О. Сравнение методов определения соединений углерода пирогенно измененных органических соединений // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1332–1345.
10. Дымов А.А., Старцев В.В., Зуева О.М. Углерод водорастворимых соединений в лесных почвах и его постпирогенная динамика (на примере республики Коми) // Лесоведение. 2018. № 5. С. 359–371.
11. Захаров В.Л. Наиболее распространенные организмы-биоиндикаторы плодородия почв Севера ЦЧР // Агропромышленные технологии Центральной России. 2021. № 2(20). С. 25–46. <https://doi.org/10.24888/2541-7835-2021-20-25-46>
12. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2016. 356 с.
13. Казеев К.Ш., Одабашиян М.Ю., Трушков А.В., Колесников С.И. Оценка влияния разных факторов пирогенного воздействия на биологические свойства чернозема // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1372–1382.
14. Казеев К.Ш., Трушков А.В., Одабашиян М.Ю., Колесников С.И. Постагрогенное изменение ферментативной активности и содержания органического углерода чернозема в первые 3 года залежного режима // Почвоведение. 2020. № 7. С. 901–910.
15. Нижельский М.С., Казеев К.Ш., Вилкова В.В., Колесников С.И. Ингибирование ферментативной ак-

- тивности чернозема обыкновенного газообразными продуктами горения растительных материалов // Почвоведение. 2022. № 6. С. 728–736.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22060090>
16. Нижельский М.С., Казеев К.Ш., Шхапацев А.К., Колесников С.И. Использование активности ферментов для диагностики последствий фумигации дымом почв [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журн. 2021. № 4. Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/4/st_426.pdf.
<https://doi.org/10.51419/20214426>
17. Никитин Д.А., Семенов М.В., Чернов Т.И., Ксенофонтowa Н.А., Железова А.Д., Иванова Е.А., Хитров Н.Б., Степанов А.Л. Микробиологические индикаторы экологических функций почв (обзор) // Почвоведение. 2022. № 2. С. 228–243.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22020095>
18. Старцев В.В., Дымов А.А., Прокушкин А.С. Почвы постпирогенных лиственников Средней Сибири: морфология, физико-химические свойства и особенности почвенного органического вещества // Почвоведение. 2017. № 8. С. 912–925.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X17080111>
19. Терехова В.А. Биотестирование экотоксичности почв при химическом загрязнении: современные подходы к интеграции для оценки экологического состояния (обзор) // Почвоведение. 2022. № 5. С. 586–599.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22050094>
20. Шабанов В.В., Солошенко А.Д. Количественные методы оценки плодородия для целей точного мелиоративного регулирования // Природообустройство. 2020. № 4. С. 13–22.
<https://doi.org/10.26897/1997–6011/2020–4–13–22>
21. Шурыгин С.Г. Влияние пожаров на водный режим осушенных минеральных почв // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2019. № 54. С. 79–83.
22. Alcaniz M., Outeiro L., Francos M., Farguell J., Ubeda X. Long-term dynamics of soil chemical properties after a prescribed fire in a Mediterranean forest (Montgri Massif, Catalonia, Spain) // Science of the total environment. 2016. V. 572. P. 1329–1335.
23. Certini G., Moya D., Lucas-Borja M.E., Mastrolonardo G. The impact of fire on soil-dwelling biota: A review // Forest Ecology and Management. 2021. V. 488. P. 118989.
24. Chen Y., Wei T., Sha G., Zhu Q., Liu Z., Ren K., Yang C. Soil enzyme activities of typical plant communities after vegetation restoration on the Loess Plateau, China // Applied Soil Ecology. 2022. V. 170. P. 104292.
25. Chodak M., Sroka K., Wos B., Pietrzykowski M. Chemical and microbial properties of post-mining and post-fire soils afforested with different tree species // Applied Soil Ecology. 2022. V. 171. P. 104321.
26. Fernandez-Garcia V., Miesel J., Baeza M.J., Marcos E., Calvo L. Wildfire effects on soil properties in fire-prone pine ecosystems: Indicators of burn severity legacy over the medium term after fire // Applied Soil Ecology. 2019. V. 135. P. 147–156.
27. Gonzalez-Perez J.A., Gonzalez-Vila F.J., Almendros G., Knicker H. The effect of fire on soil organic matter – a review // Environment international. 2004. V. 30. № 6. P. 855–870.
28. Humphreys F.R., Craig F.G. Effects of fire on soil chemical, structural and hydrological patterns // Conference on Fire and the Australian Biota. Canberra (Australia), 9 Oct 1978. Australian Academy of Science, 1981.
29. Kolesnikov S., Timoshenko A., Minnikova T., Tsepina N., Kazeev K., Akimenko Y., Zhadobin A., Shuvaeva V., Rajput V.D., Mandzhieva S., Sushkova S., Minkina T., Dudnikova T., Mazarji M., Zhadobin A., Alamri S., Siddiqui M.H., Singh R.K. Impact of Metal-Based Nanoparticles on Cambisol Microbial Functionality, Enzyme Activity, and Plant Growth // Plants. 2021. V. 10. P. 2080.
<https://doi.org/10.3390/plants10102080>
30. Koster K., Aaltonen H., Berninger F., Heinonsalo J., Koster E., Ribeiro-Kumara C. Impacts of wildfire on soil microbiome in Boreal environments // Current Opinion in Environmental Science & Health. 2021. V. 22. P. 100258.
31. Lombao A., Barreiro A., Carballas T., Fonturbel M.T., Martin A., Vega J.A., Diaz-Ravina M. Changes in soil properties after a wildfire in Fragas do Eume Natural Park (Galicia, NW Spain) // Catena. 2015. V. 135. P. 409–418.
32. Mallik A., Gimingham C., Rahman A. Ecological effects of heather burning: I. water infiltration, moisture retention and porosity of surface soil // J. Ecol. 1984. P. 767–776.
33. Moya D., Gonzalez-De Vega S., Garcia-Orenes F., Morugan-Coronado A., Arcenegui V., Mataix-Solera J., Lucas-Borja M.E., de las Heras J. Temporal characterisation of soil-plant natural recovery related to fire severity in burned *Pinus halepensis* Mill. // Forests. Sci. Total Environ. 2018. V. 636. P. 737–750.
34. Nichols L., Shinneman D.J., McIlroy S.K., de Graaff M.A. Fire frequency impacts soil properties and processes in sagebrush steppe ecosystems of the Columbia Basin // Applied Soil Ecology. 2021. V. 165. P. 103967.
35. Semenenko S.Y., Morozova N.V., Marchenko S.S. Studies of the Effects of Pyrogenic Exposure on the Enzymatic Activity of Chestnut and Chernozem Soils // Arid Ecosystems. 2020. V. 10. № 4. P. 384–389.
36. Singh A.K., Kushwaha M., Rai A., Singh N. Changes in soil microbial response across year following a wildfire in tropical dry forest // Forest Ecology and Management. 2017. V. 391. P. 458–468.
37. Stoof C.R., Wesseling J.G., Ritsema C.J. Effects of fire and ash on soil water retention // Geoderma. 2010. V. 159. № 3–4. P. 276–285.
38. Ulery A.L., Graham R.C. Forest fire effects on soil color and texture // Soil Sci. Soc. Am. J. 1993. V. 57. P. 135–140.
39. Zhang M., Wang W., Tang L., Heenan M., Wang D., Xu Z. Impacts of prescribed burning on urban forest soil: Minor changes in net greenhouse gas emissions despite evident alterations of microbial community structures // Applied Soil Ecology. 2021. V. 158. P. 103780.

Changes in Enzyme Activity in Post-Pyrogenic Soils (Physical Model Experiment)

V. D. Prikhodko^a, K. S. Kazeev^{a, *}, V. V. Vilkova^a, M. S. Nizhelskiy^a, and S. I. Kolesnikov^a

^a*Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090 Russia*

^{*}*e-mail: kamil_kazeev@mail.ru*

Presented data on changes in the enzymatic activity of soils under pyrogenic effects in model experiments simulating natural fires. A series of experiments aimed at studying pyrogenic inhibition of enzyme activity and dynamics of their recovery in post-pyrogenic soils were performed under laboratory and natural conditions. The objects of the study were sandy soil (Seropeski, Arenosol) and migratory-segregation black soil (Haplic Chernozem (Loamic, Pachic) Rostov region. Model experiments were carried out by treating soil samples with gas burner flame (amount of heat $87\text{--}435 \times 103$ J) and pyrogenic action of wood fuel combustion ($10\text{--}279 \times 106$ J). In the first case, the exposure duration was 1 to 5 min, and in the second case from 1 to 120 min. The response of enzymes (catalase, invertase, urease, peroxidase and phosphatase) to low-temperature plasma exposure (1–120 min) was found to differ depending on the enzyme group and degree of exposure. It was found that the depth of penetration of thermal effects in simulated fires was limited to the top soil layer (0–10 cm), and the radius of spread relative to the combustion source did not exceed 20 cm. Temperature values varied according to time, source of exposure and amount of fuel (400–600°C). Sandy soils and chernozem were heated and cooled down at different rates. The activity of catalase, invertase and urease were found to be inversely related to the intensity of pyrogenic exposure. The dynamics of enzyme activity recovery in post-pyrogenic soils was traced. Invertase activity recovered faster than catalase and urease activity, but full recovery after a year does not occur. The results obtained indicate a significantly prolonged effect of inhibition of enzymatic activity during simulation of natural fires.

Keywords: fires, burn, biological indicators, enzyme activity